

研究報告書

「やわらかいデバイスのための力学系に基づいた新規情報処理技術の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成27年10月～平成31年3月

研究者: 中嶋 浩平

1. 研究のねらい

近年、やわらかい材料でできたデバイスやロボットが数多く開発され始めている。これらはソフトデバイス・ソフトロボットと呼ばれ、そのボディのやわらかさのため、これまで実現できなかった数多くの機能を実装できることで注目が集まっている(Rus et al., *Nature* 2015)。例えば、ぶつかっても人体を傷つけないことから医療の現場やヒューマンロボットインターフェースへの利用が期待されている。また、ボディが受動的に伸縮することから、整備されていない環境や狭い穴などにも入っていくことができるためレスキュー用ロボット、あるいは形状の変形を巧みに活用して対象の形に順応して物を掴み取るグリッパーなどへの応用が考案されている(Brown et al., *PNAS* 2010)。これら多くの利点がある一方、その難点として、ソフトロボットは一般に制御するのが非常に難しいことが知られている。その理由は、やわらかい材料が外的に刺激を受けるときわめて多様なダイナミクスを生み出すことに起因する。このダイナミクスは、高次元であり、非線形、そして過去の履歴・記憶を伴っていることがほとんどである。中嶋はこれまで、このやわらかい材料の多様なダイナミクスは、まさにこれらの性質のため、それ自体、積極的に計算資源として活用できることを示してきた(Nakajima et al., *J. R. Soc. Interface* 2014; Nakajima et al., *Sci. Rep.* 2015)。これは、具体的には、Reservoir Computing (RC) (Jaeger et al., *Science* 2004; Maass et al., *Neural Comp.* 2002)のフレームワークに基づいて、やわらかい材料のダイナミクスを巨大なリカレントニューラルネットワーク(これを reservoir と呼ぶ)と捉えることで成された。このように、物理系のダイナミクスを計算資源として活用する手法は、特に Physical Reservoir Computing (PRC)と呼ばれる。本研究のねらいは、この PRC の数理を体系立て、やわらかいデバイスのための新規情報処理手法を考案することにある。

この目標を達成するため、本研究では四つの指針を策定した。まず一つ目は、物理系のダイナミクスを reservoir として活用する際の制約を明らかにし、それに対する方策を整備すること(研究テーマ A)。二つ目は、reservoir として、どのような力学系を活用すればどのような計算能力が引き出せるかを非線形力学系の視点から開拓すること(研究テーマ B)。三つ目は、物理系のダイナミクスに内在する情報の流れのネットワークを可視化し、そのネットワーク構造と情報処理能力の関連を明らかにすること(研究テーマ C)。四つ目は、以上の数理的な視点を考慮し、PRC 実装のためのプロトコルを提案することである(研究テーマ D)。

2. 研究成果

(1)概要

本研究プロジェクトは、PRC の数理を系統的に探究するため、先に述べた研究テーマ A-C の有機的な連携をもとに遂行され、研究テーマ D において、その総合的なまとめを行うという

ものであった。研究テーマ A では、実際に物理系を用いて PRC の実装を行うことで、多くの新たな知見を得ることができた。特に、柔らかい材料(論文1)のみならず、量子多体系(論文3, 4、特許1, 2)やスピントロニクス(論文5; Tsunegi et al., *J. J. Appl. Phys.* 2018)など、当初は想定していなかった物理系においても PRC が実装可能であることが共同研究者らとの研究により明らかとなった。これは PRC のフレームワークが、力学系という抽象的な数理構造のもと成立していることによる。必要となる数理的な構造を有する物理系であれば、PRC が実装可能となるというわけだ。ただし、ここで面白いのは、実装したとしても、各物理系で発揮される情報処理能力はその物性により異なる点である。これは、各物理系において応用できる情報処理の適性があることを示しており、計算の多様性を探求する端緒になると考えている。次に、研究テーマ B では、どのような力学系がどのような RC として活用できるかを探求した。特に、通常、機械学習の文脈では倦厭されがちなカオスを RC の文脈で有効活用する方策を提案した(Inoue, Nakajima, et al., *Proc. NOLTA* 2018)。これは、RC を機械学習機としてみるのではなく、非線形力学系としてみることによって明らかになった点であり、この先も展開していくべき方向性であると考えている。次に、研究テーマ C では、reservoir 内部の情報の流れとそれにより駆動される情報処理の関連について研究を行った。特に、物理系においてどのように入力の情報が流れるかを多変量の transfer entropy 解析に基づいて可視化することに成功した(論文準備中)。付随して、RC の文脈で研究が進んでいる記憶容量と reservoir 内部の情報理論的な構造が関連していることも現在明らかになりつつある。また、情報流を最大化することで駆動される力学系というものはそもそもどのようなものを数理モデルを構築して明らかにした(論文2; Haruna and Nakajima, *New J. Phys.* 2018)。以上の研究テーマ A-C で得られた知見を系統的にまとめ、研究テーマ D の一環として、現在、RC の入門書を執筆している段階にある。また、レーザーを用いた RC 研究を進めているスペインの Ingo Fischer 氏とともに Springer より出版される RC の専門書の編著を出版予定である。

(2) 詳細

ここでは、先に掲げた四つの指針のうち、研究テーマ A-C に関する成果を詳細に述べる。

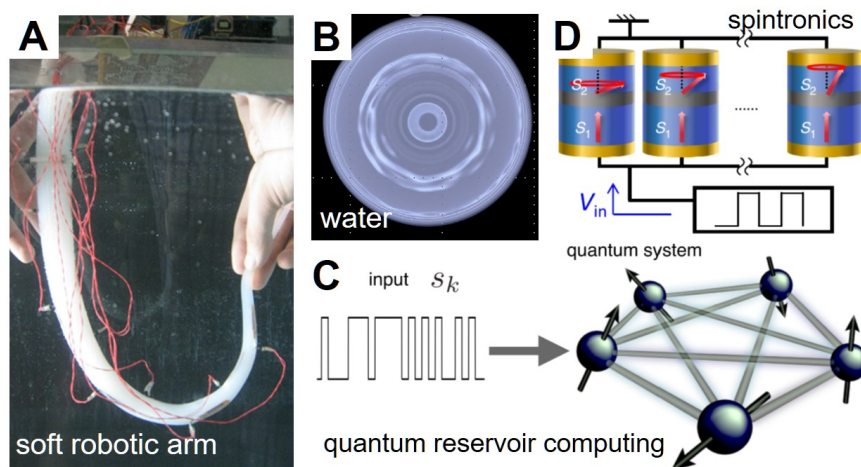


図1. 様々な物理系を活用した PRC の例。A. タコ腕型ソフトロボットアーム。B. 流体計算機の水面波の例。C. 量子多体系を用いた PRC。D. スピントロニクスを活用した PRC。

研究テーマ A: 「物理系を reservoir として活用する際の制約とそれに対する方策の考案」

ここでは、実際に様々な物理系を reservoir として活用することで研究を進めた。まずは、シ

リコンでできたタコ腕型ロボットアームを活用した研究について述べる。中嶋はこれまでもこのプラットフォームを活用し、PRC の実装を行ってきている (Nakajima et al., *J. R. Soc. Interface* 2014; Nakajima et al., *Sci. Rep.* 2015)。このプラットフォームでは、腕の根元に一つモータが付いており、これを左右に駆動することで、腕の受動的なダイナミクスを生成する(図1A)。腕の中には10個のベンドセンサーが埋め込まれており、腕の局所的な折れ曲がりを経時的に検出できるようになっている。このタコ腕を reservoir としてとらえるとき、入力とは外的に与えられるモータコマンド系列であり、それに付随して生成される受動的なタコ腕のダイナミクスが reservoir のダイナミクス、そしてそれを部分的にモニターしているのがセンサーの読み出しである。このセンサーの読み出し部に線形の結合荷重を取り付け、それを調整し学習を行う。実験者は、外部から線形で時間変化のない要素しか学習の際に付与しないことから、このシステムにおいて、記憶あるいは非線形性が重要なタスクが実装できたとすれば、それは reservoir 部の物理系のダイナミクスが寄与していることとなる。また、逆に、この方法を使うことで、物理系のダイナミクスの計算能力を問う、という方向の研究も可能となる。本研究で取り扱った課題とは次のようなものだ。“やわらかい材料を reservoir として活用する際、そのダイナミクスを読み出すには大量のセンサーが活用できることが望ましい。しかし、センサーは多くの場合、堅い材質でできており、大量に埋め込むと、本来のやわらかさ、そしてそれに付随する多様なダイナミクスが損なわれる。このとき、どのようにして、やわらかい材料から十分な情報処理能力を確保できるか？”ここでは、入出力関係のタイムスケールと reservoir のタイムスケールを変えてやることで、reservoir から時間方向の仮想ノードを調達する時間多重化法という手法を導入し、高い情報処理能力を引き出すことができることを実証した(論文1)。現在、さらにタコ腕のどのような物理的な特性が計算能力に寄与しているのかを探るため、さきがけ同領域の谷口隆晴氏とバネ・マス系のモデルを用いた数値実験を進めている(一部の結果が(Yamanaka et al., *Proc. ICANN* 2018)において出版されている)。また、新たな応用先として、やわらかい材料を指で押し込んだ時の変形のダイナミクスを reservoir として活用し、筆記体を書くキーボードを考案した((Nakajima et al., *Proc. NOLTA* 2018)、現在、ジャーナル論文準備中)。やわらかい材料の特性を有効に活用したユーザーインターフェースとして広く応用されることが期待される。

この他にも本研究プロジェクトでは多くの物理系を reservoir として活用する研究を行ってきた。まず、一つは、流体である。より具体的には、容器に液体を入れ、その容器を縦方向に加振した際に得られる水面波(これをファラデー波という)を計算資源として活用し、タイミングの制御が実装できることを実証した(図1B、現在、ジャーナル論文準備中)。また、このようなメカニカルなスケールの系に限らず、共同研究者らとともに、量子多体系(図1C、論文3、4)やスピントロニクス(図1D、論文5)のダイナミクスが有効な reservoir として活用できることを示してきた。ここでの要諦は、一つには、PRC 自体がダイナミクスをベースにしたフレームワークであり、ある種の性質を満たすダイナミクスであれば有効な reservoir として活用ができるため、きわめて広範な時空スケールの系に関して応用ができる点。もう一つには、各物理系の特殊性に応じて、実装できる計算能力が異なり、また計算の内実のみならず、エネルギー効率・速度・用途なども大きく異なってくることから計算における多様性を導入している点にある。

研究テーマ B: 「非線形力学系とそれが駆動する情報処理の間の関連の解明」

本テーマでは、RC のフレームワークのもと、どのような力学系を用意すれば、どのような情報処理が実装できるかについて、系統的に探究し、これまでの RC の視座を拡張することを企図したものである。まず、RC は力学系を情報処理デバイスとして活用する手法であるが、どのような力学系でも有効に活用できるわけではない。計算が再現的に実装できるためには、基本的に、同じ入力系列に対して、初期値によらずいつも同じ応答を示す必要がある。この性質は、これまでの RC の文脈では echo state property、そして、非線形力学系の文脈では一般化同期という現象として調べられてきたものだ(例えば、Torral et al., *CHAOS* 2011; Lu et al., *CHAOS* 2018)。ここでは、この性質を考慮に入れつつ、しかもこれまで倦厭されがちだったカオスのダイナミクスを reservoir として有効に活用する方策を提案した((Inoue, Nakajima, et al., *Proc. NOLTA* 2018)、現在、ジャーナル論文準備中)。これは、Innate training と呼ばれる手法に基づいて、カオス力学系に局所的に軌道が縮小するように設計し、計算を再現的に実装できるフェーズとカオスが残るフェーズを混在させることで実現された。この手法を用いて、これまで発見法的に見出されてきたカオスの遍歴現象の意図的な構成法に関しても提案を行った。

研究テーマ C: 「情報理論を活用した reservoir 内の情報処理の可視化と定量」

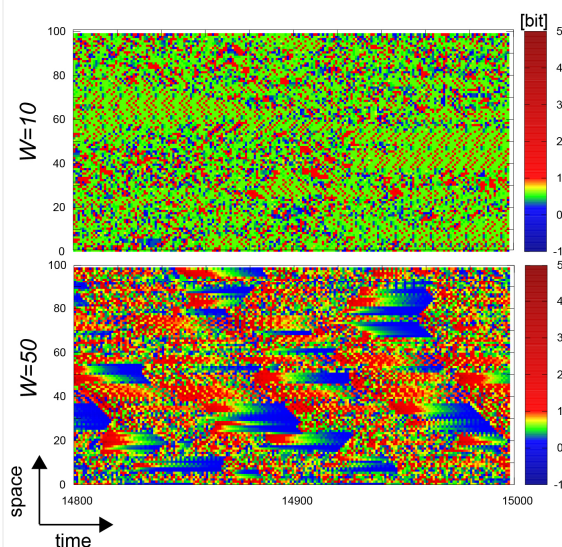


図 2. Cellular information transfer system の情報流の時空パターンの例。

本テーマでは、RC における情報理論的な側面に焦点を当てた。特に、通常、PRC においては、物理系を reservoir として活用するため、PC 内のソフトウェア上で実装されるリカレントニューラルネットワークとは異なり、内部のネットワークの構造は実験者によって明らかではない。まずは、この点を情報理論的に明らかにすることを企図した。具体的には、多変量の情報流を定量する momentary information transfer の手法 (Runge et al., *Phys. Rev. Lett.* 2012) を援用し、やわらかい材質の内部のネットワーク構造を明らかにできることを示した。さらに、それらのネットワークの構造と PRC として活用される際の記憶容量の間には関連が

あることを見出した(現在、ジャーナル論文準備中)。次に、そもそも情報流により駆動される大自由度力学系はどのような挙動を示すのかを明らかにするために、情報流を最大化するように次の時刻の状態が決まるセルオートマトン・ブーリアンネットワークを構築し解析を行った。すると、情報流を計算するための分布を調整する記憶のレンジの大きさによって、多種多様な時空間ダイナミクスが生成されることを見出した(論文2、Haruna and Nakajima, *New J. Phys.* 2018)。

3. 今後の展開

今回の研究テーマでは、やわらかい素材のデバイスに焦点を絞ったが、本研究プロジェクトを通して、数多くの物理系において PRC が実装可能であることが確認された。このことを踏まえ、引き続き、reservoir として活用される物理系の特性と PRC として実装される情報処理の関連を数理的に探究していきたいと考えている。特に、本研究プロジェクトが取り扱った PRC のフレームワークは、現在、社会的に着目されている edge computing の最たるものであり、今後、応用の側面においても急速に広がっていく技術であると考えている。

4. 自己評価

本研究プロジェクトの達成状況に関しては、多少の時間的な遅れがあるものの、概ね予定通り進めることができた。時間的な遅れの原因は、一つには PRC の数理を探索するという理論的な側面と流体計算機などの実験研究の側面を実質的には一人で遂行せざるを得なかったこと(研究補助員はいたものの)が挙げられる。ただし、PRC のフレームワークを開拓するには実装の局面を自ら知る必要があるため、両面を一人で行うというのは大なり小なり不可避であったと考えている。これからは、実験も含め、何にどの程度の時間がかかるのか、どのように分担作業すべきかなどを、本プロジェクトでの反省点を活かして考慮していきたいと考えている。もう一つの理由は、PRC の応用先が当初の想定よりも格段に多かったことに由来する。ただし、これは結果としてはむしろ良かった点に含まれると考えている(特に、共同研究者らと PRC に基づいた特許申請も行った(特許1, 2))。本研究プロジェクトで得られた研究知見が、この先、様々な実装の局面で活かされることを期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. K. Nakajima, H. Hauser, T. Li, R. Pfeifer, Exploiting the Dynamics of Soft Materials for Machine Learning, Soft Robotics 2018, 5 (3), pp. 339–347. |
| 2. K. Nakajima, T. Haruna, Spatiotemporal dynamics driven by the maximization of local information transfer, New Journal of Physics 2019, 21, 013034. |
| 3. K. Fujii, K. Nakajima, Harnessing disordered-ensemble quantum dynamics for machine learning, Physical Review Applied 2017, 8, 024030. |
| 4. K. Nakajima, K. Fujii, M. Negoro, K. Mitarai, M. Kitagawa, Boosting computational power through spatial multiplexing in quantum reservoir computing. Physical Review Applied 2019, 11, 034021. |
| 5. T. Furuta, K. Fujii, K. Nakajima, S. Tsunegi, H. Kubota, Y. Suzuki, S. Miwa, Macromagnetic simulation for reservoir computing utilizing spin-dynamics in magnetic tunnel junctions, Physical Review Applied 2018, 10, 034063. |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 2 件

1.

発 明 者: 藤井啓祐、中嶋浩平

発明の名称: 量子情報処理システム、量子情報処理方法、プログラム、及び記録媒体

出願人: 国立大学法人京都大学

出願日: 2016 年(平成 28 年) 1 月 27 日

出願番号: 2016-013659

PCT 国際出願

出願日: 2017 年(平成 29 年) 1 月 26 日

出願番号: PCT/JP2017/002705

2.

発明者: 根来誠、北川勝浩、中嶋浩平、藤井啓祐

発明の名称: 量子計算装置及び量子計算方法

出願人: 国立大学法人大阪大学, 国立大学法人京都大学

出願日: 2017 年(平成 29 年) 2 月 8 日

出願番号: 2017-021450

PCT 国際出願

出願日: 2018 年(平成 30 年) 2 月 5 日

出願番号: PCT/JP2018/003750

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

・特集: AI の身体性「体で計算するコンピューター」(日経サイエンス 2018 年 8 月号)

http://www.nikkei-science.com/201808_032.html

・Invited talk at IROS 2018 Workshop on Soft Robotic Modeling and Control: Bringing Together Articulated Soft Robots and Soft-Bodied Robots, "Physical Reservoir Computing for Soft Robots", 5 Oct. 2018, Madrid, Spain.

・IBISML/PRMU/CVIM 合同研究会にて招待講演 (FIT2018 と同時開催), 「Reservoir Computing の展開」, 2018 年 9 月 21 日, 福岡工業大学 D37, Japan.

・Invited talk at Special Session "Non-Algorithmic Computing by Complex Systems Session" in The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018), "A Recipe for Designing Chaotic Itinerary: Innate Training Approach", 2-6 Sep. 2018, Palau de Congressos de Tarragona, Tarragona, Spain.

・Invited talk at Workshop on Advanced Fabrication and Morphological Computation for Soft Robotics (in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2017, Singapore), "Exploiting the dynamics of soft materials for machine learning", 29 May 2017, Sands Expo and Convention Centre, Marina Bay Sands, Singapore.